



A-1

4006.4

G. BONGIOVANNI

L'ELETTRICITÀ

e la teoria elettromagnetica della luce

Estratto dalla *Biblioteca delle Scuole Italiane*

(N. 5-6-7-8 Vol. III)



VERONA

DONATO TEDESCHI E FIGLIO

EDITORI

1894.

G. BONGIOVANNI

L'ELETTRICITÀ

e la teoria elettromagnetica della luce

Estratto dalla *Biblioteca delle Scuole Italiane*
(N. 5-6-7 Vol. III)



VERONA

DONATO TEDESCHI E FIGLIO

EDITORI

1926

VERONA 1800 — STAB. G. CIVELLI.



L'elettrizzazione di un corpo è una quantità fisica suscettiva di misura: si considera quindi lo stato elettrico come dovuto ad una quantità di elettricità, che dicesi la *carica* del corpo. I due modi di elettrizzamento, chiamati da prima vitreo e resinoso, danno, riuniti, un risultato che si ottiene come quello dell'addizione algebrica di due termini simili di segno contrario; onde essi distinguonsi, assai più propriamente, con le denominazioni di stato elettrico positivo e negativo; e si considerano, rispondenti ai due modi di essere di segno opposto di una medesima quantità. Sotto questo aspetto si deve ammettere che, nei diversi processi di elettrizzamento (strofinio, influenza, contatto di corpi eterogenei ecc.), la quantità dell'elettricità non è aumentata nè diminuita, e che quindi l'elettricità non si produce, nè si distrugge, vale a dire si conserva; imperocchè per i detti processi si destano sempre entrambi i due stati elettrici in quantità eguale. L'elettrizzamento si riferisce perciò

al passaggio di elettricità da un corpo ad un altro o da una ad altra parte dello stesso corpo, onde uno dei corpi, o una delle parti del corpo, viene ad avere maggiore quantità di elettricità che prima e l'altro corpo, o l'altra parte, meno; cioè uno dei due stati elettrici è riguardato come dovuto ad un eccesso e l'altro ad un difetto di elettricità, in confronto dello stato naturale. Non vi ha ragione alcuna per ammettere che piuttosto l'uno dell'altro dei due stati elettrici corrisponda all'eccesso di elettricità (1), ma, nel linguaggio, si considera rispondente all'eccesso quello di essi che, per convenzione, si ritiene come positivo. L'ipotesi unitaria o Frankliniana, che fu seguita dai grandi elettricisti italiani, non differisce da questo concetto, se non in quanto in essa l'elettricità veniva chiamata un fluido. Deve notarsi però che era così designata solo per indicare la sua scorrevolezza nei conduttori, e non perchè le si attribuissero le altre proprietà de' fluidi reali, inerzia, peso, elasticità ecc.; chè anzi era considerata come profondamente diversa dalla materia, diverse sendo affatto da quelle della materia le azioni che presenta; ed era detta perciò un fluido imponderabile. Ma il nome di fluido, applicato all'elettricità, ebbe un inconveniente grave, quello che, chiamando così l'elettricità, si credette volgarmente di dire, di sapere, che cosa essa fosse.

L'elettrizzazione richiede un lavoro o, più generalmente, somministrazione di energia; e il ritorno allo stato naturale dà luogo a calore, luce, decomposizioni chimiche, effetti meccanici, cioè a manifestazioni di energia. Dopo che fu stabilito, in sulla metà del secolo

(1) Le recentissime ricerche sui fenomeni elettrici provocati dalle radiazioni più rifrangibili, intorno alle quali lavora fra noi con tanta lena e così grande successo il Chiar. prof. Righi, stabiliscono una notevolissima differenza fra i due modi di elettrizzazione; chè le dette radiazioni promuovono una rapida dispersione solo delle cariche negative.

presente, il grande principio della conservazione dell'energia (1), il quale domina e regge la scienza tutta, si considerò da alcuni, forse dai più, l'elettricità come una trasformazione del lavoro speso nell'eletttrizzamento; ed il calore, la luce, gli effetti meccanici e chimici della scarica, come una trasformazione dell'elettricità in queste diverse forme di energia. Se così fosse, l'energia prodotta dalla scarica di una determinata quantità di elettricità dovrebbe essere proporzionale a questa quantità ed indipendente dal conduttore in cui si trova; invece le esperienze del Riess (2) sul calore prodotto dalla scarica delle batterie, e quelle molto più recenti del professore E. Villari sul calore della scintilla (3), hanno mostrato che la quantità di calore svolto è proporzionale al quadrato della carica, per una data batteria, e in ragione inversa del numero delle bottiglie in cui una data carica è distribuita. Non potendosi dunque ammettere trasformazione di elettricità in energia e per conseguenza neppure di energia in elettricità, come devesi interpretare il lavoro richiesto dall'eletttrizzazione, l'energia che, sotto diverse forme, si estrinseca nella diseletttrizzazione? Riflettiamo, dice il prof. Ròiti (4), che si richiede lavoro anche per attinger l'acqua da un pozzo e portarla in un serbatoio elevato, donde, scendendo, può produrre le più svariate manifestazioni di energia; e che certamente il lavoro speso non si è trasformato in acqua, nè questa poi nella caduta si trasforma in energia. L'acqua in tali operazioni si conserva: il lavoro che si spende nel sollevarla è impiegato a vincere il peso dell'acqua e si trasforma in energia potenziale di gravità, per la quale

(1) Lo stabilì per il primo l'Holmboltz, nella sua celebre Memoria: *Die Erhaltung der Kraft*, nel 1847.

(2) Poggend. Ann., Bd. XL o XLIII.

(3) Journal de Physique, t. IX, 1890.

(4) Elem. di fisica 2.a ediz., V. 2.º, pag. 236.

energia l'acqua in alto è atta a restituirci quel lavoro e ce lo restituisce effettivamente, sotto una od altra forma di energia, nella discesa. Similmente possiamo, anzi dobbiamo, ammettere che il lavoro speso nell'elettrizzazione non si trasforma in elettricità, ma è impiegato a vincere le forze elettriche, che si destano per l'elettrizzazione, aumentano con la medesima, e devono essere continuamente superate affinché dessa proceda. Il detto lavoro si trasforma in energia potenziale relativa a queste forze, cioè in energia potenziale elettrica; la quale poi, scomparendo nella diselettrizzazione, perchè in questa le forze elettriche finiscono per essere soddisfatte, somministra l'energia che si ha dalla scarica, energia che deve essere equivalente al lavoro speso nell'elettrizzazione.

Questo modo di concepire le trasformazioni di energia, che accompagnano l'elettrizzazione e la diselettrizzazione, mena a conseguenze conformi ai risultati sperimentali, come mostra la seconda teoria del potenziale, che tanto ordine e rigore ha messo nello studio dei fenomeni elettrici, e che ha, ben si può dire, rinnovata la scienza di questi. Il *potenziale elettrico* è la condizione dell'elettricità che corrisponde all'altezza di livello dell'acqua: come l'acqua di due serbatoi è a livello differente o uguale, secondo che, fatti comunicare, vi ha passaggio o no del liquido dall'uno all'altro, così due conduttori sono detti a potenziale diverso o eguale, secondo che vi è passaggio o no di elettricità dall'uno all'altro, quando sono messi in comunicazione; e come più alto o maggiore è il livello dell'acqua in quello dei due recipienti in cui la quantità dell'acqua diminuisce, così si considera più alto o maggiore il potenziale in quello dei due conduttori in cui la carica elettrica viene scemando. La variazione di livello, che ha luogo nei due recipienti, non è uguale, ma minore in quello di sezione più grande; similmente la variazione di potenziale, che avviene nei due conduttori, non è la stessa. Onde il concetto della

capacità elettrica, la quale corrisponde alla sezione del recipiente nel caso dell'acqua, e si misura dal rapporto fra la quantità di elettricità ed il potenziale corrispondente; come la sezione retta di un vaso cilindrico potrebbe misurarsi dal rapporto fra la quantità d'acqua e l'altezza corrispondente del livello. Ma mentre la sezione di un recipiente, vale a dire la capacità per l'acqua, non è alterata dai recipienti vicini, che non comunicano con quello, la capacità elettrica di un conduttore è alterata dai conduttori vicini isolati da esso; i quali, per il fenomeno dell'influenza elettrica, accrescono la capacità del detto conduttore e tanto più quanto essi sono più vicini al medesimo e più capaci: e su questo fatto sono basati i *condensatori elettrici*, disposizioni che, sotto piccola superficie, presentano una grande capacità.

I livelli dell'acqua si contano da un livello determinato, quello dell'oceano o dei mari con esso comunicanti, livello che, a motivo della vastità del bacino, si può supporre invariabile, non ostante sottrazioni o comunicazioni artificiali d'acqua; analogamente il potenziale elettrico si conta da quello del suolo, il quale, a cagione della grandissima capacità elettrica del nostro globo, si può considerare invariabile, mal grado le sottrazioni o comunicazioni di elettricità dovute alle elettrizzazioni promosse artificialmente. E come il livello del mare si può ritenere invariabile anche non ostante le grandi sottrazioni e comunicazioni naturali d'acqua, dipendenti dall'evaporazione e dalle precipitazioni, cioè non ostante gli scambi d'acqua fra esso e l'atmosfera; così il potenziale del suolo può essere risguardato invariabile anche ad onta degli scambi di elettricità fra la terra e l'atmosfera e dei fenomeni di influenza, che avvengono per l'elettrizzamento atmosferico e le sue variazioni.

Il livello idraulico si misura prendendo la sua distanza verticale dal livello del mare, ma si potrebbe, teorica-

mente almeno, valutare dal lavoro corrispondente al passaggio di una data massa, per es. di 1 grammo, da quel livello al suolo, *per una via qualunque*, essendo questo lavoro indipendente dal cammino tenuto dalla massa nella discesa, e proporzionale all'altezza del livello da cui la medesima cade; anzi non si potrebbe operare altrimenti se il livello non si vedesse. Similmente il potenziale elettrico di un conduttore si misura dal lavoro della forza elettrica, esercitantesi sull'unità di elettricità (1), nel passaggio di questa dal conduttore sino al suolo; lavoro che è il medesimo qualunque sia la strada che tiene la detta unità, e tanto se essa va al suolo mantenendosi nel cammino sempre raccolta in un punto, o fluendo come l'acqua.

I livelli si considerano anche nei punti dove non vi ha acqua, cioè in ogni punto dello spazio; similmente il potenziale elettrico si considera in ogni punto del *campo*, vale a dire dello spazio in riguardo all'azione di cui si tratta, spazio che teoricamente è indefinito, ma che praticamente si può supporre limitato ai confini oltre ai quali l'azione è insensibile; e si definisce potenziale elettrico in un punto il lavoro della forza elettrica, esercitantesi sull'unità di elettricità, nel passaggio di questa da quel punto all'infinito o ai limiti del campo, dove il potenziale è nullo, poichè all'infinito o ai limiti del campo l'elettricità non è più soggetta all'azione dei corpi elettrizzati a cui il campo è dovuto, e quindi al moto di essa non corrisponde più lavoro. Ma invece che all'infinito o ai limiti del campo, può dirsi al suolo, imperocchè, quando l'elettricità è arrivata al suolo, si può considerare sottratta alla forza elettrica del campo. In somma la superficie del suolo si può, anzi si deve, riguardare come confine comune a tutti i campi elettrici, non al-

(1) Dicendo unità di elettricità, intendo l'unità di elettricità positiva.

trimenti che la superficie del mare si può, anzi si deve, considerare come limite del campo di gravità; e perciò il potenziale del suolo si suppone uguale a zero e si misura il potenziale elettrico dal lavoro corrispondente al passaggio dell'unità di elettricità dal punto a cui si riferisce il potenziale al suolo; come si fa uguale a zero il livello del mare, e si valuta l'altezza del livello dalla distanza verticale di questo dal mare, o dal lavoro corrispondente al passaggio dell'unità di peso dal livello che si vuol misurare a quello del mare.

Dalla data definizione consegue immediatamente che la differenza di potenziale di due punti rappresenta il lavoro della forza elettrica nel passaggio dell'unità di elettricità dall'uno all'altro; e che quindi il limite del quoziente della detta differenza per la distanza dei due punti, quando questa distanza diminuisce indefinitamente, esprime la componente, secondo la direzione da essi individuata, della forza esercitantesi sull'unità di elettricità nell'uno o nell'altro dei punti, cioè della così detta *intensità del campo* nei medesimi. Il potenziale è dunque una funzione delle coordinate dei punti del campo, le cui derivate rispetto a queste rappresentano le componenti dell'intensità del campo secondo gli assi; funzione che fu considerata prima dal Laplace nel caso dell'attrazione di massa (1), ed applicata poscia elegantissimamente dal Green (2) alla teoria dei fenomeni elettrostatici.

Per mezzo di questa funzione, che ebbe dal Green il nome di *funzione potenziale*, e poscia dal Gauss (3)

(1) *Mécanique céleste*, 1799-1826.

(2) *An essay on the application of mathematical analysis to the theories of electricity and magnetism*, Nottingham, 1828.

(3) *Allgemeine Lehrsätze in Beziehung auf die in verkerten Verhältnisse des Quadrats der Entfernung wirkenden Anziehungs und Abstossungskräfte*, 1839.

L'applicazione del potenziale è stata poi svolta dal Betti nella sua classica opera: *Sulle forze che agiscono secondo la legge di Newton*.

quello che porta attualmente di *potenziale*, si dimostra essere conseguenza necessaria della legge del Coulomb che l'elettricità in equilibrio nei conduttori è distribuita unicamente sulla loro superficie esterna, e che nulla è l'azione sua in ogni punto interno ai medesimi, appartenente o no alla massa conduttrice; e la verifica sperimentale di questa conseguenza costituisce la prova migliore dell'esattezza di quella legge, e della validità sua anche per le distanze piccolissime, per le quali la bilancia del Coulomb non consente la dimostrazione.

Alle superficie orizzontali o di livello corrispondono le superficie equipotenziali del campo elettrico. La direzione della forza elettrica in un punto del campo è normale alla superficie equipotenziale che passa per questo punto, perchè la componente di quella forza in una direzione qualunque presa sulla detta superficie è nulla, sendo in questa costante il potenziale. Le linee che tagliano ortogonalmente le superficie equipotenziali sono dunque le *linee di forza*, cioè le linee che hanno in ogni punto la direzione della forza, chiamata *direzione del campo*; e le quali possono, come ideò felicemente il Faraday, rappresentare in ogni punto, con la *densità* loro, l'altra condizione del campo, l'intensità (1).

Per l'equilibrio elettrico in un conduttore deve il po-

(1) A ciò bisogna condurre, o [immaginare condotte, le linee di forza per modo che il loro numero, nei diversi elementi uguali di una superficie equipotenziale, sia proporzionale all'intensità del campo in essi; ma siccome allora le linee di forza risultano stabilite in tutto il campo, bisogna aver fatto vedere innanzi che la detta proporzionalità, stabilita su di una superficie equipotenziale, si verifica su tutte le altre. Ora ciò ha luogo realmente, come dimostra il Bertrand nelle sue *Leçons sur la théorie mathématique de l'électricité*, Paris, 1890, quando la forza è in ragione inversa del quadrato della distanza, ma in nessun'altro ipotesi; talchè la legge dell'azione in ragione inversa del quadrato della distanza è la sola che permette la rappresentazione dell'intensità del campo mediante le linee di forza, secondo l'idea del Faraday.

tenziale essere lo stesso in tutti i punti della massa conduttrice del medesimo: nel caso dell'equilibrio, la superficie esterna del conduttore è dunque una superficie equipotenziale del campo, e le superficie equipotenziali nell'interno del conduttore sono indeterminate. Ciò giustifica l'espressione « potenziale di un conduttore », che si usa invece di dire « potenziale in un punto qualunque del conduttore ».

La costanza del potenziale alla superficie esterna di un conduttore è la condizione analitica che serve a determinare la distribuzione dell'elettricità in equilibrio sulla medesima, cioè la *densità elettrica* in ogni punto di essa. La forza elettrica alla superficie di un conduttore è normale a questa superficie, sendo essa una superficie equipotenziale del campo; e non è costante, ma proporzionale in ogni punto alla densità elettrica, per il celeberrimo teorema del Green (1). Come si esercita una forza sull'unità di elettricità supposta aggiunta alla superficie del conduttore nel punto considerato (*la forza elettrica*), si esercita pure una forza sull'elettricità che effettivamente si trova su di ogni elemento della detta superficie; per la quale forza, che è normale a questa superficie, diretta verso all'esterno ed è chiamata *tensione elettrica*, l'elettricità tende ad abbandonare il conduttore. Onde la dispersione elettrica, che cresce al crescere del potenziale, e avviene maggiormente dai luoghi ove la superficie è più curva, perocchè la tensione è proporzionale al quadrato della densità elettrica, e questa aumenta col potenziale ed è maggiore dove più curva è la superficie. La dispersione elettrica

(1) Questo teorema, scoperto dal Green nel 1823 (op. cit.), fu ritrovato di nuovo dal Gauss e dal Chasles nel 1839; i quali non avevano notizia della Memoria del geometra inglese, che da prima non fu considerata quanto meritava.

può trovare analogia nelle fughe d'acqua determinate dalla pressione idrostatica, le quali aumentano al crescere dell'altezza del livello e si producono più copiosamente dai punti più bassi, essendo quella pressione proporzionale all'altezza del livello.

Dalla definizione del potenziale si desume immediatamente il lavoro delle forze elettriche nella scarica di un conduttore, o il lavoro da spendere per vincere le medesime nella carica, lavori che rappresentano entrambi l'energia potenziale del conduttore carico; e si trova che quest'energia è misurata dalla metà del quoziente del quadrato della carica per la capacità, conformemente ai risultati sperimentali citati del Riess e del Villari. In virtù poi della relazione fra la carica, la capacità e il potenziale, l'energia potenziale elettrica è anche espressa dal semiprodotto della carica per il potenziale o della capacità per il quadrato del potenziale. Il coefficiente $1/2$, che entra nelle tre espressioni dell'energia potenziale elettrica di un conduttore, dipende dalla diminuzione del potenziale, mentre le diverse cariche elementari, in cui si può decomporre la carica totale del conduttore, vanno successivamente al suolo. Se si trattasse di una *sorgente* di elettricità, cioè di un conduttore in cui il potenziale si mantiene costante sebbene perda o riceva elettricità, il lavoro corrispondente al passaggio di una data quantità di elettricità, dalla medesima al suolo, sarebbe rappresentato dal prodotto di questa quantità di elettricità per il potenziale della sorgente; e il lavoro corrispondente al passaggio di una determinata quantità di elettricità da essa sorgente ad un'altra di potenziale minore, dal prodotto della detta quantità di elettricità per la differenza di potenziale delle due sorgenti; come il lavoro dell'acqua, nel suo passaggio da un livello costante ad un altro pure costante, più basso, è espresso dal prodotto della quantità d'acqua passata per la differenza di altezza dei due livelli.

Per la corrispondenza completa fra le trasformazioni di energia cui elettricità ed acqua danno luogo, le macchine elettriche si possono paragonare alle pompe: la macchina elettrica con entrambi i conduttori isolati, ad una pompa che attinga l'acqua da un recipiente, in cui da principio il livello sia quello del mare, e la porti in un altro, in cui pure da principio il livello sia quello del mare, con che produrrà abbassamento di livello nel primo recipiente e innalzamento nel secondo; la macchina elettrica col conduttore negativo al suolo, ad una pompa che leva l'acqua dal mare e la porta in un recipiente, in cui da prima il livello è quello stesso del mare, e non produce certo così abbassamento di livello del mare, ma innalza il livello nel recipiente; la macchina elettrica col conduttore positivo al suolo ad una pompa che cava l'acqua da un recipiente, in cui da principio il livello è quello del mare, e la porta nel mare, e determina in tal modo abbassamento di livello nel recipiente, ma non innalza di certo il livello del mare. E come nella pompa la forza da impiegare si fa maggiore col crescere della differenza di livello, e a un certo punto tale differenza cessa di aumentare, perchè le fughe, che aumentano con questa, hanno raggiunto un tal grado da far perdere, ad ogni minuto per es., tant'acqua, quanta la pompa ne trasporta, e allora la continuazione del gioco non fa che mantenere costante la differenza di livello prodotta; così nella macchina elettrica la forza necessaria si fa più grande al crescere della differenza di potenziale, ad un certo momento questa differenza non aumenta ulteriormente, in causa della dispersione, e allora la continuazione del movimento del disco non fa che mantenere costante la differenza di potenziale prodotta. E come nella pompa non tutto il lavoro speso si trova allo stato di energia potenziale di gravità nell'acqua innalzata, ma una parte è impiegato a vincere gli attriti, cioè si trasforma in calore, che si dissemina e va perduto; così nella mac-

china elettrica non tutto il lavoro che si spende si ritrova allo stato di energia potenziale elettrica nei conduttori o nel conduttore, caricato positivamente o negativamente, ma una parte è consumata dall'attrito dell'asse e specialmente dall'attrito del disco contro ai cuscinetti, e questa parte si trasforma in calore. Le macchine ad induzione, o elettroforiche, nelle quali non si ha attrito contro a cuscinetti, avranno quindi un *rendimento* molto superiore a quelle a strofinio, chè si potrebbe considerare e valutare il rendimento delle macchine elettriche, come si considera e si valuta quello delle pompe.

Le macchine elettriche non producono dunque l'elettricità, ma solo la innalzano di potenziale, come le pompe non producono l'acqua, ma solo l'innalzano di livello; onde quelle macchine, assai più propriamente che *generatori* di elettricità, si dicono *elettromotori*.

Collegando con un filo metallico i due conduttori o poli della macchina elettrica mantenuta in azione, si ha in quel filo un flusso continuo di elettricità, dal conduttore o polo di potenziale maggiore all'altro, la *corrente elettrica*. Per essa l'elettricità si abbassa gradatamente di potenziale in tutto il circuito, di quanto viene innalzata per salti in certi punti della macchina; e quindi la corrente deve estrinsecare in tutto il circuito una quantità di energia uguale al lavoro che si spende nella macchina a sollevare continuamente l'elettricità per quei salti.

Nell'anno 1800 il Volta (*tanto nomini nullum par elogium*) scopriva la piccola differenza di potenziale elettrico che si stabilisce al contatto di due metalli diversi, e chiamava *forza elettromotrice* la causa che la promoveva e manteneva. Fa meraviglia come egli, con mezzi immensamente meno adatti di quelli onde il fisico ora dispone, abbia potuto rilevare quella piccolissima differenza elettrica e trovarne le leggi; fra le quali importantissima quella che, in una catena di metalli, la dif-

ferenza di potenziale fra i metalli estremi è quale se questi fossero direttamente a contatto, talchè se la catena è chiusa una qualunque delle forze elettromotrici distrugge l'effetto delle altre, cioè la somma algebrica di tutte è nulla. Un fortunato errore, in cui cadde da prima, che i liquidi non fossero elettromotori per contatto, ma semplici conduttori, il guidò ad immaginare quella disposizione alternativa di lamine bimetalliche e di liquido, che promuove agli estremi della colonna una differenza di potenziale proporzionale al numero delle coppie, e quindi, ove questo numero sia sufficientemente grande, un potenziale abbastanza elevato da dar luogo a piccole commozioni, ad attrazione di corpi leggerissimi, a microscopiche scintille, a tutti gli effetti in somma di una piccolissima e debolissima macchina elettrica. Ma che ha dunque di notevole la pila, da essere stata chiamata, ben a ragione dall' Arago, il più maraviglioso trovato dell' umano ingegno, non escluso il telescopio e la macchina a vapore? Ciò, che la corrente dell'apparecchio voltaico è incomparabilmente più energica di quella della macchina elettrica più grande e più generosa, essendo la quantità di elettricità che passa in ogni unità di tempo per una sezione trasversale qualunque del circuito, vale a dire l'*intensità della corrente*, senza confronto maggiore nella pila che nella macchina elettrica. Questa, a circuito aperto, in virtù del potenziale assai elevato, dà effetto statico, cioè forza elettrica, tensione e quindi anche dispersione, assai grande; ma a circuito chiuso, in causa della piccolissima quantità di elettricità circolante, produce effetto dinamico, ossia ha energia, di pochissimo momento; e può assomigliarsi ad un filo d'acqua molto alto, il quale dà un effetto statico, cioè una pressione, che può far scoppiare una botte, ma, lasciato scorrere, somministra scarsissimamente energia. All'incontro la pila, a circuito aperto dà, per il potenziale debolissimo, un effetto sta-

tico meschinissimo, ma a circuito chiuso, per la grande copia di elettricità che trasporta fornisce energia in gran quantità; e si può paragonare ad un grosso fiume, a piccolo dislivello fra la sorgente e la foce, il quale, fermo, non darebbe che un effetto statico assai debole, ma, scorrente per il dolce pendio del suo letto, offre largamente energia. Come il livello dell'acqua di un fiume o di un canale diminuisce gradatamente procedendo nel senso della corrente, così nel circuito elettrico chiuso il potenziale decresce gradatamente nel senso della corrente; e per ciò appunto vi è il flusso continuo d'acqua nel primo caso, di elettricità nel secondo. Interrompendo il circuito elettrico in un punto, cioè, secondo la frase usata, aprendolo, il flusso di elettricità non può più aver luogo liberamente; e quindi, in un tempo brevissimo, il potenziale si uguaglia in tutti i punti di ciascuna delle due parti del reoforo e la corrente cessa. La differenza di potenziale, che allora si ha ai due capi, misura la forza elettromotrice della pila, cioè la somma algebrica delle differenze di potenziale che si hanno nei diversi contatti eterogenei della medesima, le quali si mantengono le stesse tanto a circuito chiuso che aperto. Riunendo i due capi del reoforo, cioè, come si dice, chiudendo il circuito, si costituisce in questo un potenziale decrescente con continuità da punto a punto, fuorché nei punti in cui operano le forze elettromotrici, nei quali rimangono le differenze finite, ossia i salti, di potenziale; e ben presto il potenziale assume in ogni punto un valore che non varia più col decorrere del tempo, sino a che il circuito rimane chiuso: allora la corrente ha presa la stessa intensità in tutti i punti del circuito, tanto all'esterno che nell'interno dell'elettromotore, e si dice che è stabilito lo *stato permanente*. Tutto ciò trova analogia nei corsi d'acqua, ne quali, intercettare il corso di questa, corrisponde ad aprire il circuito elettrico, e dare libero corso alla medesima, corrisponde a chiudere

Il circuito voltaico. L'interno della pila, cioè la parte di circuito ove risiedono le forze elettromotrici che innalzano l'elettricità, è rappresentata, nei corsi artificiali d'acqua, dal luogo dove si trovano le macchine che sollevano l'acqua, cioè dallo stabilimento idroforo; in quelli naturali dall'atmosfera, nella quale il sole solleva l'acqua, che poi scorre nei loro letti. Deve notarsi però che non tutti i contatti eterogenei della pila determinano, procedendo nel senso della corrente, innalzamento di potenziale, ma che alcuni producono invece un abbassamento di potenziale: i primi rappresentano le forze elettromotrici *operanti nel senso della corrente*, cioè che da sole promoverebero una corrente del medesimo senso di quella che si ha effettivamente nel circuito; i secondi forze elettromotrici *operanti contro corrente*, cioè che da sole determinerebbero una corrente di senso opposto a quella che si ha nel circuito.

Come la portata di un fiume dipende dal dislivello fra la sorgente e la foce e dalle condizioni del letto, così l'intensità della corrente elettrica dipende dalla forza elettromotrice della pila e dalla lunghezza, sezione e natura del circuito. Tale dipendenza è stata stabilita teoricamente dall'Ohm nel 1827 (1), ammettendo che la elettricità si propaghi nei conduttori lineari alla stessa guisa del calore in un muro, le cui facce sieno mantenute l'una ad una temperatura, l'altra ad una temperatura differente; ed è stata confermata completamente dalle numerose ricerche sperimentali posteriori. L'intensità della corrente in un tratto di circuito è dunque espressa dal prodotto della differenza di potenziale fra gli estremi del tratto per la sezione di questo e per la sua conduttività specifica, diviso per la lunghezza del medesimo. E ciò nel caso in cui fra i due estremi del

(1) Die galvanische Kette.

tratto non esistano forze elettromotrici, ch  altrimenti andrebbe aggiunta, alla differenza di potenziale fra i detti estremi, la somma algebrica di tali forze elettromotrici. Chiamando, come si usa, *resistenza* del tratto una quantit  direttamente proporzionale alla sua lunghezza e in ragione inversa della sezione e conduttivit  specifica del medesimo, pu  enunciarsi che l'intensit  della corrente   rappresentata dal quoziente della differenza di potenziale fra gli estremi del tratto (aumentata della somma algebrica delle forze elettromotrici attive fra i medesimi, se ve ne hanno) per la resistenza di esso. Da questo enunciato deriva immediatamente l'espressione notissima dell'intensit  della corrente in un circuito chiuso senza derivazioni, cio  la legge che va pi  propriamente sotto il nome dell'Ohm; e il 2.  teorema del Kirchhoff, riferentesi ad un perimetro chiuso qualunque di una rete qualsiasi di conduttori. Questo teorema poi e l'altro, conosciuto sotto la denominazione di 1.  teorema del Kirchhoff, ed esprime la condizione dello stato permanente del potenziale in ogni punto di concorso di pi  tratti di circuito, danno modo di calcolare le intensit  della corrente in tutti i lati di una rete qualunque di conduttori, in funzione delle resistenze dei lati stessi e delle forze elettromotrici attive nei medesimi.

Due quistioni ben distinte presenta la pila: quale sia la causa che determina e mantiene la differenza di potenziale nei diversi contatti; a che debba attribuirsi l'energia, la quale, sollevando continuamente, a circuito chiuso, l'elettricit  in quelli dei detti contatti, che rappresentano le forze elettromotrici operanti nel senso della corrente, fornisce a questa la propria energia. L'aver confuse queste due quistioni ha contribuito a far negare, subito dopo la scoperta del Volta, la forza elettromotrice al contatto dei metalli; a far ammettere la esistenza di forza elettromotrice solo al contatto di un

metallo con un liquido che l'intacchi, ed a riferire all'azione chimica la differenza di potenziale. L'energia della corrente è indubbiamente dovuta alle azioni chimiche che, a circuito chiuso, hanno luogo nell'interno della pila; e infatti la detta energia è equivalente al calore messo in libertà dall'insieme di quelle azioni, come si trova valutando questo calore coi dati della termochimica e paragonandolo all'energia estrinsecata dalla corrente in tutto il circuito, la quale ordinariamente è costituita, nella maggior parte, dal calore che si sviluppa nel circuito stesso, l'interno della pila compreso. La seconda questione è dunque risolta; ma non così la prima. Imperocchè, se è ben accertata l'esistenza di una differenza di potenziale in due metalli a contatto e la legge per la quale il Volta riconobbe la necessità di intercalare fra le successive coppie bimetalliche della pila uno strato di liquido, è ancora controverso, malgrado le numerose ed accuratissime ricerche in proposito, se alla produzione della detta differenza di potenziale intervenga generalmente ed essenzialmente il dielettrico ambiente; onde la causa della medesima è ancora oscura (1).

Si può dunque dire che i contatti eterogenei della pila, tanto quelli fra i metalli, come quelli fra i liquidi e i metalli, promuovono e mantengono, per cause an-

(1) Il prof. Righi, in un suo recentissimo lavoro sulle forze elettromotrici di contatto in diversi gas (*Mem. Acc. Sc. di Bologna*; e *Riv. Scient-ind. di Firenze*, giugno-luglio 1890), determinate con metodo nuovo, suggeritogli dalle proprie ricerche sui fenomeni elettrici provocati dalle radiazioni, ha trovato che la differenza di potenziale non cambia sensibilmente al mutare del gas ambiente, eccettuati i casi in cui si ha ragione di credere che questo venga assorbito dai metalli. Ma conclude che, sebbene questi risultati sembrano più favorevoli all'opinione che il gas ambiente non abbia generalmente parte essenziale nel fenomeno dell'elettricità di contatto fra i metalli, non si hanno ancora motivi seri per preferire tale opinione all'opposta.

cora non note, una scala di potenziali; e che le azioni chimiche, le quali si esplicano a circuito chiuso, eseguiscano il lavoro di sollevamento dell'elettricità per i gradini ascendenti di quella scala, e comunicano quindi all'elettricità un'energia che si estrinseca nella discesa dell'elettricità stessa lungo tutto il circuito. Una forza elettromotrice, operante nel senso della corrente, cioè la causa di uno di que' gradini ascendenti di potenziale, corrisponde al salto del canale maestro delle bonifiche e insieme al meccanismo idroforo, in virtù del quale l'acqua può superare quel salto; e lo supera, dando luogo ad una corrente continua, quando il detto meccanismo sia tenuto in azione dall'energia del sole, estrinsecata dal carbone che arde nei fianchi delle caldaie dello stabilimento idroforo; energia che non va perduta, ma si ritrova nella corrente d'acqua al di là dello stabilimento, e potrebbe essere utilizzata, come si utilizza in tante guise l'energia della corrente elettrica. Se non viene somministrata quell'energia, resta il salto e il meccanismo, ma questo rimane inattivo; l'elettricità o l'acqua non possono superare continuamente il detto salto e non si ha la corrente. Se non che, quando si chiude il circuito elettrico, si stabilisce la corrente e con questa l'azione chimica che la mantiene, e, appena si interrompe il circuito, cessa la corrente e insieme anche l'azione chimica; ma non basta lasciar libero il corso all'acqua perchè i fornelli delle caldaie si accendano, le turbine si mettano in moto e il corso d'acqua si stabilisca attraverso il salto ascendente; e non basta impedire questo corso perchè le turbine si arrestino e si spenga il fuoco nei fornelli. Dunque la pila, che rappresenta, in miniatura se si vuole, e la porzione del canale in cui vi ha il salto e questo salto e le turbine e la macchina a vapore e la provvista di carbone, è un assieme di cose assai meno grossolano, molto più perfetto; ma l'elettricità non è forse più sottile dell'acqua? Del resto tale

analogia, che potrebbe proseguirsi ancora, non prova nulla circa alla natura dell'elettricità, e serve solo a rappresentarci materialmente, in qualche modo, gli effetti di questa.

Per l'abbassarsi del potenziale proporzionalmente alla resistenza, si ha nel circuito una continua diminuzione di energia potenziale elettrica e lo sviluppo di una quantità equivalente di calore, come mostra l'espressione, trovata da prima con l'esperimento del Joule (1), del calore che si produce in una porzione qualunque, metallica o liquida, del circuito, e quindi anche in tutto il circuito; espressione che consegue immediatamente dalle leggi del decremento del potenziale in questo e dal principio della conservazione dell'energia. Questo calore poi, secondo le esperienze del Favre (2), è il calore dovuto alle reazioni chimiche che si producono nell'interno della pila, trasportato, per così dire, dalla corrente in tutto il circuito e da essa distribuito nelle diverse parti del medesimo, l'interno della pila compreso, proporzionalmente alle resistenze loro. Un filo sottile di platino, un esile filamento di carbone, chiuso in un globetto di vetro vuoto d'aria, un breve intervallo fra le estremità di due bacchette di carbone, intervallo che la corrente valica su di un ponte di particelle, che essa stessa getta e mantiene, rappresentano un tratto di circuito di grande resistenza, in cui quindi la corrente localizza molta parte del detto calore. Quel filo di platino taglia e cauterizza nel tempo stesso, quel filamento di carbone si fa incandescente e sparge una calma luce, quelle particelle di carbone, e le estremità stesse delle bacchette, sono portate al calor bianco e bruciano mandando una luce abbagliante. Nei luoghi dove il letto di un fiume o di un

(1) *Phil. Mag.* T. XIX, 1841.

(2) *Ann. de Chim. et de Phys.*, T. XL, 1854.

canale si restringe grandemente e rapidamente si abbassa, la potenza della corrente d'acqua può essere utilizzata efficacemente: in simili circostanze la corrente elettrica ci dà la *galvanocaustica*, la luce *ad incandescenza* e quella *ad arco*.

Nei punti del circuito nei quali vi ha salto di potenziale per contatto di metalli eterogenei, la corrente sviluppa calore, se il salto è un abbassamento di potenziale, assorbe invece calore, cioè raffredda, se il salto è un innalzamento di potenziale; e in ciò consiste il così detto *effetto Peltier*, da distinguersi bene dall'*effetto Joule*, vale a dire dal calore svolto per la discesa del potenziale proporzionalmente alla resistenza. In un circuito chiuso di soli metalli, la somma algebrica delle forze elettromotrici di contatto non è più nulla quando la temperatura non è uniforme; e in tal caso può sussistere una corrente, la quale ricava la propria energia dal calore che va consumato per mantenere la diversa temperatura nelle diverse parti del circuito. Vi sono dunque anche *pile termoelettriche*, e con esse il Nobili (1) insegnò primo a fare il termoattinometro squisitissimo, che fruttò le scoperte del Melloni.

Nelle porzioni di circuito costituite da corpi composti nello stato liquido, si produce una decomposizione, caratterizzata dallo svolgersi dell'elemento metallico al catodo e della rimanente parte del composto all'anodo, l'*elettrolisi*, la quale grandemente contribuì ai progressi della chimica, è retta da leggi semplicissime, ed ha avuto belle, utili e benefiche applicazioni. Essa, essendo esotermi i composti che la provano, richiede una somministrazione continua di energia per opera della corrente, energia che diviene potenziale chimica negli ioni, e a cui deve corrispondere un abbassamento di potenziale.

(1) *Antologia di Firenze*, Vol. II, 1834.

Questo abbassamento non è quello dovuto al decrescere del potenziale proporzionalmente alla resistenza, che ad esso corrisponde il calore svolto nel liquido, cioè l'effetto Joule; ma è costituito da due salti, i quali si stabiliscono agli elettrodi, in causa degli ioni che ad essi rimangono aderenti, salti che, dovendo nel loro insieme equivalere ad un abbassamento, rappresentano una forza elettromotrice operante contro corrente, e determinano, come è notissimo, una corrente contraria a quella della pila, quando si esclude questa dal circuito. La *polarizzazione degli elettrodi* è dunque necessaria e spiega l'elettrolisi. Quando manca questa polarizzazione, come allorchè si sottopone all'elettrolisi un sale mediante un anodo formato dello stesso metallo che entra nel sale, non vi ha decomposizione finale della soluzione, e tutto si riduce ad un trasporto del metallo dall'anodo al catodo. Ciò accade negli attuali misuratori della quantità di elettricità, i così detti *coulombometri*, i quali indeboliscono la corrente solo per la resistenza che rappresentano e non per una forza contro-elettromotrice che introducano nel circuito; ed ha pure luogo nei bagni per l'elettrolaminatura e l'elettrotipia. Nell'interno della pila avviene l'elettrolisi con le stesse leggi e nella stessa misura che nel circuito esterno; ed essa produce fenomeni di polarizzazione, onde si destano forze contro-elettromotrici che indeboliscono la corrente e possono pure farla cessare. Ma anche i detti fenomeni, tanto nocivi nella pila e per impedire i quali sono state proposte tante reazioni chimiche, da cui è derivato il grande numero di elementi *idroelettrici*, differenti, hanno avuta una bella applicazione. Scomponendo l'acqua con elettrodi di piombo, convenientemente preparati, l'idrogeno e l'ossigeno vengono assorbiti dai detti elettrodi, i quali rappresentano allora una forza elettromotrice e possiedono tutta l'energia spesa nella decomposizione. Questa forza elettromotrice e questa energia, che si conservano

a circuito aperto, promuovono e mantengono, a circuito chiuso, una corrente, che può essere di condizioni diverse da quelle della corrente *di carica*. Ed ecco gli *accumulatori*, i quali prestano utili servigi come serbatoi di energia, e si possono paragonare ad ampi serbatoi, che vengono caricati da una corrente d'acqua, ed estrinsecano poi, sotto forma di un'altra corrente, l'energia di quella di carica.

Venti anni dopo la scoperta della pila, l'Oersted, in una sua conferenza a Copenaghen, si accorgeva dell'azione della corrente elettrica sull'ago magnetico, rivelante finalmente il nesso cercato fra l'elettricità e il magnetismo. Il grande geometra e fisico Ampère, accintosi subito allo studio di quest'azione, ne riconosceva la reciprocità, e con una serie di induzioni e di esperienze felicissime scopriva l'azione mutua delle correnti e ne stabiliva, in celebri Memorie, la legge elementare. Pervenuto in seguito a disposizioni di correnti che, riguardo all'azione della terra e alla loro azione reciproca, si comportavano come le calamite, assurse all'ipotesi delle correnti circolari intorno alle particelle dei corpi magnetici, con la quale interpretò il magnetismo mediante l'elettrodinamica. La corrente, in virtù del campo magnetico che produce intorno a sè, campo variabile con l'intensità della medesima, che si distrugge al cessare di questa e si rianima quando essa è ristabilita, può dar luogo a spostamento di un magnete, a magnetizzazione o smagnetizzazione di un corpo magnetico o magnetizzato, a movimento di un corpo magnetico, onde le numerosissime applicazioni dell'elettromagnetismo, le quali si possono ridurre a tre categorie: misura dell'intensità della corrente; segnalazione a distanza, comprendente la telegrafia elettromagnetica, che ha risoluto il problema della telegrafia anche attraverso l'oceano; *motori elettromagnetici*.

Questi sono ora costituiti da un magnete fisso e dal-

l'*armatura*, massa di ferro dolce, mobile nel campo di quello e circondata dal reoforo. La corrente di un elettromotore circola nell'*armatura* e dà luogo a variazioni del campo, per le quali l'*armatura* stessa è costretta ad assumere un moto di rotazione, che viene trasmesso alle macchine operatrici. Più comunemente poi il campo è formato, invece che da un magnete permanente, da un elettromagnete, il quale viene eccitato dalla corrente stessa che circola nell'*armatura*.

• Il lavoro somministrato dal motore elettromagnetico è a spese dell'energia della corrente, onde il calore che si sviluppa nel circuito deve essere in minor quantità quando il motore lavora che quando sta fermo, e la differenza delle due quantità di calore deve essere equivalente al lavoro prodotto, come riconobbe il Favre (1). Per la legge del Joule, l'intensità della corrente deve quindi essere minore nel primo caso che nel secondo, come indica appunto il galvanometro; ed essendo in entrambi la stessa la resistenza del circuito, la diminuzione della detta intensità, quando il motore lavora, non può essere prodotta che da forze contro-elettromotrici, che si destino per il moto dell'*armatura* nel campo magnetico (2). Queste forze elettromotrici devono destarsi anche quando il moto dell'*armatura* sia prodotto altrimenti che da una corrente: i motori elettromagnetici sono dunque invertibili, cioè divengono elettromotori, quando si mantenga il moto dell'*armatura* mediante

(1) *Compt. rend.* T. XLVI, 1858; e *Favre et Laurent*, ibid. T. L.

(2) Il Bertrand però (*Op. cit.*, chap. XI, *Théorie de l'induction*) dice che vi ha esagerazione nel vedere in queste considerazioni la prova e la spiegazione dei fenomeni d'induzione; che certamente esse mostrano dover prodursi, quando la corrente somministra un lavoro, un fenomeno nuovo, ma che la previsione di questo fenomeno col solo ragionamento è impossibile; che non si può ammettere *a priori* dover esso consistere in una diminuzione di intensità della corrente, cioè nello sviluppo di forze contro-elettromotrici.

una forza meccanica. Ed ecco le macchine *magneto-elettriche*, le quali ricavano l'energia della corrente che producono dal lavoro che bisogna spendere in esse per vincere la resistenza invisibile generantesi al moto dell'armatura, per la corrente stessa promossa da questo movimento, macchine che ora si chiamano *dinamo-elettriche* o, più brevemente, *dinamo*. L'elettromagnete di campo è in esse eccitato dalla corrente di un elettromotore distinto ovvero, più di frequente, dalla corrente stessa della macchina, corrente che da principio, è prodotta dal debole magnetismo residuo dei nuclei dell'elettromagnete; e la quale, passando in questo, lo eccita, da prima debolmente e poi grado a grado più fortemente, a misura che più intensa diviene la corrente medesima, per l'aumentata intensità del campo. Questa *auto-eccitazione*, immaginata quasi contemporaneamente da W. Siemens, dal Wheatstone e da altri nel 1867, può poi venire fatta in due modi, che vengono distinti con le denominazioni *in serie*, *in derivazione*.

L'energia delle pile è molto costosa, come si riconosce osservando che essa, in ultima analisi, proviene dalla combustione di zinco, e che, per mantenere costante la corrente, bisogna dar luogo ad altre reazioni chimiche, le quali pure importano spesa. Nella pila Daniell, una delle più economiche, e la sola che convenga per un servizio continuo, il Regnier, tenendo calcolo di tutto, anche del valore del rame ridotto, valuta a 4 lire il prezzo del cavallo per ogni ora. Assai meno economiche sono le pile termoelettriche, chè nella Clamond per es., secondo il Regnier stesso, il costo del cavallo-ora si eleva a L. 18,75 valutando a 15 centesimi per metro il prezzo del gas. Le grandi applicazioni dell'elettricità all'illuminazione, alla trazione, al trasporto della forza, alla metallurgia, richiedevano elettromotori ben altrimenti economici e potenti, e questi furono offerti dalle

macchine magnetoelettriche, dopo che il Gramme (1), nel 1870, adottò in esse l'armatura ad anello, immaginata sette anni innanzi dal prof. Pacinotti per un motore elettrico, e da lui proposta sino d'allora per le macchine magnetoelettriche (2). Le grandi dinamo, che hanno rese pratiche le dette applicazioni industriali dell'elettricità, animate dai perfezionatissimi motori a vapore attuali, possono dare il cavallo di forza col consumo di un chilogramma e mezzo di carbone per ora, cioè con la spesa di 2 centesimi all'ora; e ciò malgrado il piccolo rendimento delle macchine a vapore. Ove poi si abbiano cadute d'acqua naturali, si possono impiegare per le dinamo motori idraulici, e allora possono essere anche più economiche quelle applicazioni dell'elettricità.

Se due dinamo sono poste in uno stesso circuito, e si fa agire una di esse come macchina magnetoelettrica, cioè come generatrice di corrente, l'altra agisce come motore elettrico; e l'energia meccanica che somministra può dirsi essere quella spesa nella prima macchina, trasportata per mezzo dell'elettricità nella seconda; ed ecco il trasporto elettrico della forza. Ma non tutta l'energia che la prima macchina, la *generatrice*, trasforma in energia elettrica viene trasportata nella seconda, la *ricettrice*: una parte di quell'energia si perde lungo la strada per l'effetto Joule. Si dimostra facilmente che la massima potenza della ricettrice si ha con un rendimento elettrico di trasporto (rapporto del lavoro elettrico che si ha nella ricettrice a quello della generatrice) del 50 0/0, corrispondente ad un rendimento effettivo del 34 0/0; e che per trasportare in queste condizioni, che sono in generale le migliori, una data potenza a distanze diverse, bisogna mantenere costante

(1) Compt. Rend., T. LXXIII, 1871.

(2) N. Cimento, T. XIX, giugno 1864.

il rapporto fra la forza elettromotrice della generatrice e la resistenza totale del circuito; e quindi aumentare quella forza elettromotrice, o la sezione del conduttore di linea, mano a mano che cresce la distanza. Questo è lo scoglio contro cui urta il trasporto elettrico dell'energia, chè l'uso di forze elettromotrici straordinariamente grandi presenta inconvenienti e pericoli, e l'aumento della sezione della linea accresce grandemente la spesa d'impianto. Il Wan Rysselberghe (1), confrontando i diversi modi di trasporto e distribuzione dell'energia, mediante l'acqua, l'aria compressa, il gas illuminante, l'elettricità, trova che quest'ultimo è il meno economico; e confessa non prestarsi l'elettricità, allo stato attuale delle nostre cognizioni almeno, per il trasporto economico dell'energia, e ciò a cagione della legge del Joule.

Il telefono Bell è una macchina magnetoelettrica invertibile, e due di questi telefoni, inseriti in uno stesso circuito, trasportano dall'uno all'altro l'energia della voce. La corrente elettrica ondulatoria, promossa dalle vibrazioni che la voce fa eseguire alla lamina di ferro del trasmettitore, deve ben riflettere tutte le circostanze delle dette vibrazioni, imperocchè, arrivata al ricevitore, riproduce nella lamina di questo, non solo il periodo e la forma delle medesime, cioè l'altezza ed il metallo della voce, ma anche le altre condizioni che costituiscono l'articolazione. Il microfono, apparecchio per mezzo del quale le vibrazioni meccaniche di una laminetta di sostanza qualunque determinano variazioni di resistenza elettrica, e quindi variazioni di intensità della corrente di una pila inserita nel circuito, sostituito al telefono

(1) *Théorie élém. de l'Électricité et du Magnétisme*, Gand, 1889. 4^a partie.

Anche dati i addotti precedentemente, sul costo dell'energia somministrata dalle pile o dalle dinamo, sono tolti da quest'opera.

trasmettitore, ha dato la telefonia attuale, emula ormai della telegrafia.

Il microfono e la pila non vengono però inseriti nel circuito di linea, ma in un circuito locale, comprendente inoltre un rocchetto di filo grosso di rame a nucleo di ferro dolce. Sopra questo rocchetto è avvolto un altro filo di rame assai più lungo e sottile, inserito nella linea, all'altra estremità della quale si trova il ricevitore. Così le variazioni di intensità della corrente locale, promosse dal microfono, destano correnti (correnti *indotte*) nel filo esterno del rocchetto, cioè nel filo di linea, le quali fanno agire il telefono ricevitore. E invero si destano correnti in un circuito, non solo per il suo moto in un campo magnetico (correnti delle macchine magnetoelettriche), ma anche per le variazioni del campo magnetico in cui si trova (1), e quindi pure per le variazioni di intensità di una corrente vicina, e molto più nell'atto del cessare e dello stabilirsi di questa. E dovranno poi destarsi correnti in un circuito anche per il moto relativo fra esso ed una corrente vicina, chè in tal caso si può considerare quel circuito mobile in un campo magnetico costante, o fisso in un campo magnetico variabile; e le correnti che si destano, dovendo, come nel caso delle macchine magnetoelettriche, opporre resistenza al movimento che le provoca, saranno di tal senso da tendere a produrre, per la loro azione sulla *corrente induttrice*, un moto di senso opposto a quello. Le grandi scoperte del Faraday, i fenomeni d'induzione elettro-

(1) E ciò spiega l'ufficio del nucleo di ferro dolce dell'armatura di dette macchine, chè quel nucleo, per il suo moto nel campo del magnete fisso, subisce variazioni di magnetizzazione, cioè determina intorno a sè un campo magnetico variabilissimo: il filo che avvolge l'armatura si può quindi considerare mobile nel campo costante del magnete fisso e fisso nel campo variabile dell'armatura: e per l'una e l'altra circostanza insieme vengono promosse correnti in quel filo.

magnetica e elettrodinamica, sono dunque indicati dal principio della conservazione dell'energia (1), e non solo nella loro esistenza, ma anche nelle leggi loro, le quali prima erano state stabilite, in classici lavori, dal Neumann e dal Felici, da quest'ultimo con metodo simile a quello tenuto dall'Ampère per le azioni elettrodinamiche.

Nell'apparecchio che va sotto il nome del Ruhmkorff, le correnti indotte nel filo esterno lungo e sottile sono promosse dallo stabilirsi e dal cessare della corrente di una pila, che circola nel filo interno grosso e corto, e dal conseguente magnetizzarsi e smagnetizzarsi del nucleo di ferro dolce, magnetizzazione e smagnetizzazione da cui poi si trae profitto per chiudere ed aprire automaticamente il circuito induttore. Per la grande lunghezza del filo esterno, la forza elettromotrice indotta è grandissima, e quindi essa produce forti commozioni, scintille lunghe, effetti cioè paragonabili a quelli delle macchine elettriche. Questi rocchetti trasformano, si può dire, la corrente induttrice in un'altra di potenziale assai più elevato, ma di intensità molto minore; però essi possono, viceversa, trasformare una corrente di alto potenziale, lanciata nel filo lungo e sottile, in un'altra di potenziale minore, ma di intensità molto più grande, nell'altro filo; e allora sono i *trasformatori* propriamente detti, che si adoperano adesso nelle distribuzioni elettriche, specie in quelle a grandi distanze con dinamo a correnti alternate, e che furono immaginati dal povero Gaulard e da lui sperimentati con successo, per il trasporto della forza, durante l'esposizione di Torino del 1884.

Al grande progresso della scienza elettrica e delle sue applicazioni in questi ultimi anni, non è stata estranea

(1) Vedasi la nota (2) a pag. 25.

l'idea felice di abbandonare le unità empiriche per le diverse quantità elettriche e di derivare le unità per tutte queste quantità dalle unità proposte dal Gauss come fondamentali per le misure scientifiche, l'unità di lunghezza, quella di tempo e quella di massa; sistema dal Gauss seguito nelle sue celebri misure magnetiche assolute e detto per ciò poscia *sistema assoluto*.

A due diversi sistemi di misure elettriche ha dato origine quell'idea: il sistema *elettrostatico*, e l'*elettromagnetico*. Nel primo l'unità principale è quella di elettricità, derivata dalla legge elementare delle azioni elettrostatiche, dalla quale unità si passa a quella di corrente, mediante la definizione dell'intensità di corrente, e da questa all'unità di polo magnetico o di magnetismo, per mezzo della formula esprime la legge elementare elettromagnetica; nel secondo l'unità principale può dirsi essere quella di polo magnetico, derivata dalla legge elementare delle azioni magnetiche, legge affatto simile a quella delle azioni elettrostatiche. Da questa unità si passa, nel sistema elettromagnetico, a quella di corrente mercè la formula suddetta della legge elementare elettromagnetica, e dall'unità di corrente all'unità di elettricità, come nell'altro sistema si passa da questa a quella. In entrambi i sistemi poi si deriva l'unità di potenziale, o di forza elettromotrice, che dir si voglia, dall'unità di lavoro meccanico e da quella di elettricità, e l'unità di resistenza dalle unità di forza elettromotrice e di corrente per mezzo della legge d'Ohm.

È stato preferito il sistema elettromagnetico, per cui le unità elettriche adoperate ora nella scienza sono le unità elettromagnetiche del sistema assoluto seguito attualmente, il quale ha per unità di lunghezza il centimetro, di tempo il secondo, di massa il grammo. Le unità elettromagnetiche centimetro-secondo-grammo non sono però convenienti in pratica, chè, essendo in generale troppo grandi o troppo piccole, in confronto delle

quantità elettriche che più frequentemente si devono misurare, danno per misure di queste numeri troppo piccoli o troppo grandi. Se, per ovviare a questo inconveniente, si fossero assunti come unità pratiche dei multipli delle unità elettromagnetiche C. S. G., scelti solo per modo che le unità fossero risultate di grandezza opportuna, avrebbero potuto presentarsi nelle formule coefficienti numerici, e si sarebbe perduto il vantaggio del sistema assoluto, che li bandisce: si è quindi pensato di adottare anche in pratica un sistema elettromagnetico assoluto, ma avente per unità fondamentali un'altra lunghezza invece del centimetro, un'altra massa invece del grammo, un altro tempo, se fosse stato necessario, in luogo del secondo, in guisa che le unità per le quantità elettriche più comuni risultassero convenienti. E così è stato stabilito il sistema *pratico* o *tecnico* di misure elettriche, il quale è un sistema elettromagnetico assoluto, avente ad unità fondamentali 10^9 centimetri, circa il quadrante terrestre, per la lunghezza, il secondo ancora per il tempo, $1/10^{11}$ di grammo per la massa. Per giustificare questo sistema, nel quale le diverse unità sono state designate coi nomi dei fisici a cui maggiormente deve la scienza dell'elettricità, basta dire che in esso l'unità di forza elettromotrice, il *volta*, è circa la forza elettromotrice dell'elemento Daniell; e che l'unità di resistenza, l'*ohm*, è poco superiore all'unità empirica di resistenza che prima si aveva, cioè alla resistenza di una colonna di mercurio di 1 millimetro quadrato di sezione e di 1 metro di lunghezza alla temperatura di 0° . Il Congresso degli elettricisti, tenuto a Parigi nel 1881, affidò ad una Commissione internazionale di stabilire la lunghezza che doveva avere a 0° una colonna di mercurio, di 1 millimetro quadrato di sezione, per rappresentare, a questa temperatura, l'*ohm*. Molti fisici intrapresero con metodi diversi questa determinazione, nella quale l'Italia si è fatta molto onore per opera del prof. Röntgen;

e la Conferenza internazionale del 1884, discussi i risultati molto concordanti presentati, ha fissato la detta lunghezza, per l'*ohm legale*, a 106 centimetri, valore che si ha ragione di ritenere pochissimo differente da quello che compete all'*ohm vero o teorico*.

Il rapporto fra l'unità elettromagnetica e quella elettrostatica di elettricità è indipendente dall'unità di massa e varia in ragion diretta dell'unità di tempo ed inversa dell'unità di lunghezza, cioè ha le dimensioni di una velocità; e il suo valore, che è stato determinato primamente dal Weber e dal Kohlrausch insieme e poi da molti altri fisici con metodi diversi (1), differisce assai poco da quello della velocità della luce. L'uguaglianza fra il detto rapporto (il quale spesso si incontra nello studio teorico delle azioni elettromagnetiche) e la velocità della luce, fu il filo che guidò il Maxwell al suo grande concepimento, la *teoria elettromagnetica della luce*.

I numerosissimi e svariatissimi fenomeni elettrici ed elettromagnetici soddisfano al principio della conservazione dell'energia, anzi alcuni di essi, quelli di induzione per es., sono indicati dal medesimo, le leggi loro quantitative sono così bene stabilite che i detti fenomeni si possono, nella maggior parte, calcolare in tutte le loro circostanze: può quindi credersi che si sappia a sufficienza su di essi, e che ormai non si debba pensare che a trarne

(1) Per valore del rapporto delle due unità di elettricità, cioè per il numero di unità elettrostatiche contenute in un'unità elettromagnetica, chiamato *velocità critica*, Weber e Kohlrausch (1856), mediante la misura di una quantità di elettricità nei due sistemi, trovarono $3,1074 \times 10^{10}$ centimetri-secondi; il Maxwell (1868), equilibrando un'attrazione elettrostatica con una repulsione elettromagnetica, $2,8798 \times 10^{10}$; W. Thomson (1869), con misure di un potenziale nei due sistemi, $2,825 \times 10^{10}$ (Wiedemann, *Galvanismus*, Schlusscapitel); più recentemente Ayrton e Perry, misurando nei due sistemi la capacità di un condensatore, $2,98 \times 10^{10}$; ecc.

profitto nel miglior modo, seguendo la sentenza del Franklin: non essere per noi molto interessante sapere in qual maniera la natura opera le sue leggi, ma bastarci conoscere quali esse sieno. Il Franklin aveva pienamente ragione al suo tempo, in cui lo studio dell'elettricità era nell'infanzia, ed era assai più necessario moltiplicare e diversificare i fatti, cercarne con ogni cura le leggi, che pensare alle teorie; ma ora che non difettano le basi su cui fondare i concepimenti non è inopportuno investigar la natura dei fenomeni elettrici. Questa investigazione risponde ad una tendenza dello spirito umano, alla quale obbediva il Franklin stesso, stabilendo la sua ipotesi del fluido unico; e può essere feconda di nuovi risultati, di altre scoperte, come è stata la teoria ondulatoria della luce. D'altra parte poi l'utilità immediata non è la più alta ricompensa delle ricerche scientifiche.

Quando, in sullo scorcio del secolo passato, le sperienze del Coulomb ebbero stabilita la legge elementare delle azioni elettrostatiche, che è quella stessa dell'attrazione di massa, i matematici si diedero con ardore a svilupparne le conseguenze, a dedurne la distribuzione dell'elettricità in equilibrio sui conduttori; e gli splendidi risultati dell'analisi fecero perdere di vista il meccanismo per cui si esercitavano le dette azioni, le quali furono risguardate, tacitamente o esplicitamente, *azioni a distanza*, vale a dire esercitanti si direttamente senza l'intervento di un mezzo, come un'azione a distanza era considerata la gravitazione. Ma dopo le scoperte delle azioni elettromagnetiche e della induzione, si riconobbe che la legge del Coulomb era affatto insufficiente per rappresentare i nuovi fenomeni, nei quali il movimento e il tempo hanno una così grande influenza. Il Weber, introducendo nella formula del Coulomb due termini rappresentanti la dipendenza dell'azione dalla velocità e dall'accelerazione delle quantità di elettricità in pre-

senza, ed ammettendo, col Fechner, che nella corrente vi abbiano due flussi di senso opposto, l'uno di elettricità positiva, l'altro di negativa, giunse è vero ad una formula generale (1), che comprende quella elettrodinamica dell'Ampère e il fatto e le leggi dell'induzione; ma queste sapientissime speculazioni, continuate e modificate dallo Shering, da Carlo Neumann, dal Kirchhoff, dall'Helmholtz, ecc. (2), se riuscivano a rappresentare, sino ad un certo punto, i fenomeni, facevano scomparire la semplicità primitiva del sistema, la quale costituiva la ragion principale della sua probabilità scientifica; e non spargevano luce sulla natura dell'elettricità. Poteva invece suppersi che le azioni elettriche ed elettromagnetiche si esercitassero per contiguità di particelle di un mezzo, concetto questo che non ripugna alla mente, o che almeno non è incomprendibile, come quello di un'azione a distanza, e lascia libero campo ad indagini sul meccanismo onde si esercita l'azione. Già il Priestley, nella sua storia dell'elettricità, aveva avvertito quanto fosse superficiale l'idea di un'azione a distanza; ma il primo che abbia saputo resistere all'opinione dominante e sia partito nelle concezioni sui fenomeni elettrici unicamente da quanto indica l'esperienza, fu il grande Faraday. Avendo riconosciuto che l'induzione elettrostatica si dispiega in diverso grado nei diversi coibenti, cioè che essi hanno un *potere induttore specifico*, ammise che la detta azione si esercitasse in virtù del coibente interposto, o del *dielettrico*, come egli lo chiama; e per una modificazione del medesimo, la quale, in seguito ad alcune esperienze, ritenne fosse una specie di tensione secondo le linee di forza. Il simigliante suppose avvenire nel caso dell'azione elettromagnetica o magnetica, e pensò

(1) W. Weber, *Electrodynamische Maassbestimmungen*. 1846.

(2) Vedał Wiedemann, *Galvanismus, Schlusscapitel*.

che questa, la quale si esercita anche nel vuoto, potesse essere una funzione dell'etere, chè egli dice non è inverosimile abbia l'etere altri uffici, oltre quello di essere il veicolo delle radiazioni luminose e calorifiche (1). Per il Faraday la sola realtà tangibile furono le forze elettriche e magnetiche, e l'elettricità e il magnetismo divennero oggetti di esistenza assai contestabile. Dove i matematici non vedevano che punti elettrizzati o magnetizzati e distanza, egli, con gli occhi dello spirito, vide un mezzo attraversato dalle linee di forza, le quali per lui non erano solo una finzione matematica; e si accinse a dar base sperimentale a queste sue concezioni. Si domandò da prima se la trasmissione delle forze elettriche e magnetiche richiedesse un tempo, o fosse istantanea, ma non ottenne risposta a questa quistione capitale. Più fortunato fu nella ricerca di relazioni fra la luce e l'elettromagnetismo, chè scoprì la rotazione del piano di polarizzazione per il passaggio della luce attraverso ad un campo magnetico molto intenso, fenomeno che rivelava un intimo nesso fra l'esercizio delle forze elettromagnetiche e la funzione luminifera dell'etere.

Ma questa relazione rimaneva quasi isolata, le esperienze non concorrevano numerose in favore delle idee del Faraday, la scuola degli eminenti matematici alemanni era al più alto grado di splendore, quando I. Clerk Maxwell, in cui non si sa se più ammirare la dottrina del matematico, l'acume del filosofo o la potenza dell'immaginazione, datosi, come egli dice (2), a tradurre in forma matematica i concepimenti del Faraday, trovò che la velocità di propagazione di una perturbazione elettromagnetica nell'aria era espressa dal rapporto dell'unità elettromagnetica all'unità elettrostatica di elettricità, e

(1) *Experimental Researches*, § 3075.

(2) *Treatise on Electricity and Magnetism*. Profusione alla 1^a ed., 1873.

che quindi poteva ritenersi uguale alla velocità della luce, essendo il rapporto delle due unità di elettricità assai prossimamente uguale, come ho accennato, a questa velocità. Non solo nell'aria, ma anche negli altri coibenti, le due velocità potevano ritenersi uguali, chè la velocità di propagazione di una perturbazione elettromagnetica in un coibente doveva, secondo la teoria del Maxwell, essere uguale a quella nell'aria divisa per la radice quadrata del potere induttore specifico rispetto all'aria (1); la velocità della luce in un mezzo è, come consegue dalla teoria ondulatoria, uguale a quella nell'aria divisa per l'indice di refrazione relativo fra il mezzo e l'aria; e, confrontando i poteri induttori specifici dei coibenti rispetto all'aria, con gli indici loro di refrazione rispetto all'aria stessa, si era trovato che la radice quadrata dei primi era poco diversa dai secondi (2).

L'uguaglianza della velocità di propagazione avvalorava grandemente l'idea del Faraday che uno stesso mezzo fosse il veicolo dell'azione elettromagnetica e della luce; e da ciò il Maxwell fu condotto ad allargare le formule, in guisa da far loro esprimere, oltre ai fenomeni elettromagnetici conosciuti, una classe di fatti ipotetici, le ondulazioni elettriche e magnetiche; le quali trovò che doveano essere trasversali rispetto alla direzione di propagazione, come trasversale è l'ondulazione eterea che costituisce la luce. La perturbazione elettro-

(1) *Maxwell, Op. cit.* 2^a ed., 1881; cap. XX (Teoria elettromagnetica della luce) § 784.

(2) L'indice di refrazione di uno stesso mezzo è diverso per le diverse lunghezze d'onda: nel detto confronto si deve prendere l'indice di refrazione corrispondente ad onde lunghissime, quali si ha ragione di credere che sieno le onde di perturbazione elettromagnetica, indice il quale si calcola da quelli del mezzo per le onde luminose, mediante la formula del Cauchy, che lega l'indice di refrazione alla lunghezza d'onda.

Maxwell, Op. cit., 2^a ed. 1881; cap. XX, §§ 784-780.

magnetica non solo dunque si propagava con la velocità stessa della luce, nell'aria e negli altri mezzi coibenti, ma era della stessa natura della perturbazione luminosa; e quindi il Maxwell inferì che questa era di origine elettromagnetica, cioè che la luce era un fenomeno elettromagnetico; e in ciò consiste la sua *teoria elettromagnetica della luce*. La quale non scuoteva la teoria ondulatoria della luce, che è fondata su basi troppo solide: la luce restava, nella teoria del Maxwell, un'ondulazione trasversale dell'etere, solo di natura elettromagnetica, invece che elastica; e ciò toglieva una difficoltà fondamentale della teoria dei Fresnel e dei Cauchy; chè, considerando, con questi sommi, la vibrazione eterea di natura elastica, bisognava supporre che l'etere fosse solido, non osservandosi e non potendo esistere nei fluidi che vibrazioni longitudinali; e la solidità dell'etere e l'inapprezzabile resistenza da esso offerta al moto dei pianeti non è agevole vedere come possano accordarsi.

La dimostrazione sperimentale dell'esistenza di onde elettromagnetiche trasversali, propagantisi nei coibenti con la velocità stessa della luce, è stata offerta solo due anni fa dalle mirabili esperienze del professore Hertz di Karlsruhe (1).

La scintilla elettrica, che per la sua brevissima durata potrebbe sembrare un fenomeno semplicissimo, è costituita da una numerosissima successione di scariche alternativamente di senso contrario, cioè da una serie di

(1) Le memorie originali dell'Hertz, relative a quest'esperienza, si trovano nel vol. 31, 34, 36 e 37 degli *Ann. del Wiedemann* degli anni 1887-88-89.

L'Hertz ha poi pubblicato un sunto delle sue ricerche negli *Arch. des sc. phy. et nat. de Genève*, t. XXI, aprile 1889. Questo sunto si trova tradotto nel *N. Cimento*, t. XXV, maggio e giugno 1889.

Le esperienze dell'Hertz sono state ripetute, nella massima parte, dal prof. Joubert nel Laboratorio centrale di elettricità della piazza S. Carlo a Parigi. Vedi *Bull. de la Soc. intern. des Électriciens*, t. VI, n. 50, 1889.

oscillazioni elettriche, e l'Hertz l'assomiglia ad un tocco di campana, il quale risulta da una serie di vibrazioni. Come quando si mettono in comunicazione due serbatoi, contenenti acqua a livello differente, l'uguaglianza di livello non si stabilisce definitivamente se non dopo una successione di piccole oscillazioni, così l'uguaglianza di potenziale fra due conduttori a potenziale differente non si stabilisce che mediante una serie di rapide oscillazioni elettriche isocrone: anche qui dunque non manca l'analogia con l'acqua.

L'Helmholtz nel 1847 (1) aveva considerata la scarica delle batterie come una successione di passaggi alternativi dell'elettricità dall'una all'altra armatura, onde l'energia elettrica si trasformava in calore; W. Thomson nel 1855 (2) aveva trovato teoricamente che, in certe condizioni, la scarica elettrica doveva essere oscillatoria e data una formula che esprime il periodo delle oscillazioni; e il Feddersen (1861), il Paalzow (1863), l'Oettingen avevano, con metodi diversi, constatato il fatto e verificati i risultati della teoria. L'Hertz ebbe la felice idea di cercare se queste oscillazioni dessero luogo nel mezzo circostante a fenomeni di interferenza, che avrebbero dimostrata la realtà delle onde elettriche, ne avrebbero data la lunghezza, dalla quale essendo noto il periodo di vibrazione, si sarebbe potuto ottenere la velocità di propagazione.

Se non che le più rapide delle oscillazioni osservate della scarica avevano il periodo di un milionesimo di secondo, troppo grande per poter osservare i detti fenomeni, imperocché ad esso corrisponde (se la velocità di propagazione è, come vuole la teoria del Maxwell,

(1) *Die Erhaltung der Kraft*, pag. 44.

(2) *Phil. Mag.*, vol. V, pag. 393.

Vedi anche Wiedemann, *Galvanismus*, vol. II, § 795.

quella stessa della luce) la lunghezza d'onda di 300 metri, e le azioni elettriche ed elettromagnetiche divengono insensibili ad una distanza di pochissimi metri. Abbisognavano dunque vibrazioni almeno cento volte più rapide, e queste ottenne l'Hertz facendo avvenire le scintille di un rocchetto del Ruhmkorff nella breve interruzione di un asticella metallica, terminata da due grandi sfere o lamine conduttrici. Ottenute così le vibrazioni elettriche convenienti, restava a trovare il modo di riconoscere a qualche distanza l'effetto loro, e il rinvenne appropriatissimo in un semplice filo metallico, piegato in cerchio e presentante in un punto una brevissima interruzione spinterometrica. Questo così detto *conduttore secondario*, quando aveva dimensioni convenienti ed era disposto opportunamente, rispondeva, con scintilluzze nella sua interruzione, alle scariche dell'*eccitatore* o *conduttore primario*, anche a distanza di parecchi metri. Diminuendo le dimensioni del conduttore primario, riconobbe che bisognava diminuire anche quelle del secondario, affinché questo scintillasse bene; e l'Hertz vide in ciò a ragione un fenomeno simile a quello della risonanza, e chiamò quindi il conduttore secondario *risonatore elettrico*. Col suo *corista elettrico* (così può chiamarsi il conduttore primario) e col risonatore elettrico accordato con quello, non tardò ad ottenere e riconoscere i fenomeni di interferenza che cercava, prima lungheggiando fili metallici, tesi perpendicolarmente all'eccitatore, poi nell'aria libera: Riferirò solo e brevemente l'esperienza fatta in questa. Disposto il conduttore primario all'estremità di una lunga sala, portò il secondario in prossimità del muro opposto e osservò che restava muto; ma, allontanandolo gradatamente da questo muro, vide comparire le scintilluzze, farsi mano a mano più intense sino ad una determinata distanza, quindi diminuire e diventare invisibili in una certa posizione. Passata questa, le scintilluzze ricomparivano, aumentavano

di intensità sino ad un'altra posizione, a partire dalla quale ricominciavano a diminuire, per annullarsi di nuovo ad una distanza dal muro doppia di quella a cui erano scomparse la prima volta (1). Questa esperienza, condotta su di un noto esperimento acustico del Savart, provava l'esistenza di nodi e ventri fissi di vibrazione elettrica, cioè di un sistema di onde stazionarie, che dovevano attribuirsi alla sovrapposizione delle onde progressive generate dal conduttore primario, con quelle riflesse dalla parete. Duplicando la distanza di due nodi consecutivi, doveva ottenersi la lunghezza dell'intera onda progressiva, e, dividendo questa per la durata di una vibrazione completa delle scariche dell'eccitatore, data dalla formula del Thomson, doveva aversi la velocità di propagazione delle vibrazioni elettriche del-

(1) Il conduttore secondario circolare, adoperato in questa esperienza, veniva tenuto in modo che il suo piano passasse per la direzione del primario, cioè per la direzione delle oscillazioni elettriche di questo. Le oscillazioni elettriche del secondario, che promuovevano le scintille in questo, erano prodotte dalla forza elettrica agente nel punto del medesimo diametralmente opposto alla sua interruzione. Tali scintille indicavano quindi lo stato elettrico oscillatorio, non della posizione in cui si trovava l'interruzione del secondario, ma di quella in cui era situato il punto diametralmente opposto del medesimo. Così, in vicinanza del muro o di un nodo, le dette scintille erano assai più deboli quando l'interruzione era rivolta dalla parte opposta al muro, o dalla parte opposta al nodo, che quando essa era rivolta verso al muro o verso al nodo; invece in prossimità di un ventre esse presentavano presso a poco la medesima intensità, tanto se l'interruzione era rivolta da una parte che dalla parte opposta.

Lucien de la Rive ed E. Sarasin, ripetendo le esperienze di interferenza dell'Hertz, hanno trovato che, per uno stesso eccitatore, risonatori di diverse dimensioni indicano lunghezze d'onda differenti. Ciò sembra provare che l'eccitatore produce un insieme di vibrazioni di periodi differenti, cioè una vibrazione complessa, e che ogni risonatore sceglie in questa il periodo di vibrazione che gli conviene, come i risonatori acustici scelgono in un suono composto i suoni semplici per cui sono fatti (Vedasi *Compt. rend.* 1890).

l'eccitatore, la quale risultò così poco diversa da quella della luce.

In questa esperienza le onde elettriche dirette e riflesse erano sovrapposte, essendo l'incidenza normale; l'Hertz volle vedere se, nel caso dell'incidenza obliqua, esse fossero separate, e se la riflessione avvenisse allora con le leggi di quella di un fascio di luce. Frustranei riuscirono i tentativi che fece all'uopo con le onde, lunghe circa 3 metri, dell'esperienza precedente; ma non si scoraggiò. Ricorse ad un eccitatore che dava vibrazioni dieci volte più rapide e quindi onde dieci volte più corte; e il dispose nella linea focale di un grande specchio cilindrico concavo, a sezione parabolica, giudicando che così le ondulazioni elettriche, se si riflettevano come le luminose, avrebbero dovuto essere rinviate in una sola direzione e quindi si sarebbero indebolite meno nel propagarsi; e mal non si appose, chè per tal modo ottenne un buon effetto sul conduttore secondario anche a 10 metri di distanza. Pensò poscia di aumentare ancora l'effetto concentrando il fascio a raggi paralleli, emesso dal conduttore primario, sul secondario; e a ciò fece questo rettilineo e lo collocò nella linea focale di un altro specchio uguale al primo. Così il secondario scintillava anche a 20 metri di distanza dal primario. Già gli effetti assai più intensi, ottenuti con queste disposizioni, indicavano che le onde elettriche emesse dall'eccitatore si riflettevano con le medesime leggi della luce; l'Hertz allora fece cadere obliquamente su di una grande lamina metallica il fascio emesso dal primo specchio e, cercando col secondo la posizione in cui si aveva il maggior effetto sul risonatore che conteneva, riconobbe direttamente che si verificavano quelle leggi. Con un grandissimo prisma di asfalto, constatò poscia, sempre mediante i due specchi, una refrazione dei raggi elettrici, nello stesso senso e presso a poco dello stesso grado della refrazione luminosa; Questo risultato vinse la sua aspet-

tazione, chè, egli dice, se non aveva dubbi sulla riuscita delle sperienze di riflessione, non aveva molta fiducia nel successo di quelle di refrazione.

Collocati i due specchi uno di faccia all'altro, osservò che lamine coibenti, disposte trasversalmente fra i medesimi, ed anche l'imposta di una porta di legno, non indebolivano sensibilmente le scintilluzze del risonatore. All'incontro i corpi conduttori interposti, e la sua persona pure, toglievano l'effetto sul conduttore secondario, cioè gettavano un'ombra elettrica: la propagazione avveniva dunque in linea retta.

Le vibrazioni elettriche del conduttore primario sono nella direzione della forza elettrica, e quindi nella direzione del conduttore stesso, cioè della linea focale dello specchio. Le dette vibrazioni erano dunque perpendicolari alla direzione di propagazione; e nel propagarsi conservavano la loro direzione, cioè si mantenevano parallele al conduttore primario, imperocchè l'effetto sul secondario era massimo quando le linee focali dei due specchi erano parallele, andava diminuendo quando si faceva girare uno di questi intorno al loro asse comune, e diveniva nullo allorchè le dette linee focali erano ridotte perpendicolari l'una all'altra. Il fascio elettrico emesso dal conduttore primario poteva dunque paragonarsi ad un fascio di luce polarizzato in un piano. Per confermare ciò, l'Hertz interpose fra i due specchi una serie di fili di rama, tesi parallelamente fra i due lati opposti di un telaio di legno; e riconobbe che, quando questa specie di *reticolo* aveva i suoi fili paralleli alla linea focale dello specchio portante il conduttore primario, sopprimeva affatto l'azione sul secondario, e la lasciava invece inalterata allorchè i detti fili erano perpendicolari a quella linea focale: quel reticolo si comportava quindi come una tormalina rispetto ad un fascio di luce polarizzato in un piano. Ma che più!, ridotte perpendicolari le linee focali dei due specchi, in guisa che nullo,

in assenza del reticolo, fosse l'effetto sul conduttore secondario, l'interposizione del reticolo, co' suoi fili inclinati a 45° rispetto alle due dette linee focali, faceva ricomparire quell'effetto, come una lamina birefrangente, interposta fra due tormaline incrociate o due Nicol incrociati, illumina il campo. La vibrazione del conduttore primario, pervenuta al reticolo, si decompone in due, una secondo i fili, che viene assorbita, l'altra perpendicolare ad essi, che passa inalterata; e la quale, essendo inclinata, ma non perpendicolare, alla direzione del conduttore secondario, ha azione sul medesimo (1).

Esistono dunque le ondulazioni elettriche, si propagano

(1) Alle variazioni di intensità di una corrente corrispondono variazioni dell'intensità del campo magnetico che essa produce intorno a sé, ossia variazioni di intensità della forza magnetica, che essa esercita su ogni punto, la quale è normale al piano determinato da questo e dalla corrente. Alle vibrazioni elettriche dell'eccitatore dell'Hertz, devono dunque corrispondere variazioni della forza magnetica, cioè vibrazioni magnetiche, le quali saranno normali alla direzione di propagazione, ed anche alla direzione dell'eccitatore, ossia delle vibrazioni elettriche. I raggi polarizzati emessi dal conduttore primario, si devono quindi considerare costituiti da vibrazioni trasversali elettriche, nel piano contenente il detto conduttore, e da vibrazioni trasversali magnetiche, nel piano perpendicolare al conduttore medesimo; e perciò, se si domanda quale sia il piano di vibrazione di que' raggi, se cioè esso sia il piano contenente l'eccitatore o quello ad esso perpendicolare, bisogna distinguere se trattasi della vibrazione elettrica o di quella magnetica. E ciò può spiegarsi come non abbia potuto essere risolta definitivamente in ottica la questione di stabilire quale dei due piani di simmetria di un raggio polarizzato rettilineamente sia il piano di vibrazione, vale a dire se questo piano sia quello dei due che, per convenzione, si chiama piano di polarizzazione, o il piano a questo perpendicolare.

Il Maxwell (*Op. cit.*, §§ 796, 797), considerando la propagazione di un'onda elettromagnetica in un mezzo in cui il potere dielettrico sia differente nelle diverse direzioni, trovò che il piano della perturbazione elettrica era perpendicolare a quello che si definisce in ottica come piano di polarizzazione, e questo criterio, indicato dal Maxwell per una conferma della sua teoria, è stato recentemente verificato dal prof. Fitzgerald di Dublino.

con la stessa velocità della luce, si riflettono e refrangono come questa, sono trasversali come le luminose, perchè come queste danno fenomeni di polarizzazione; solamente sono molto più lunghe delle onde luminose; ma ciò non è una differenza essenziale, come non è essenziale la differenza fra le onde luminose e quelle semplicemente calorifiche.

Più splendido trionfo non poteva sperare la teoria del Maxwell! L'analisi matematica, ai trionfi avvezza, scrive anche questo e se ne allegra, lamentando solo che il Maxwell non abbia potuto assistervi.

L'Hertz, in una splendida comunicazione delle sue esperienze al Congresso dei naturalisti e medici alemanni ad Heidelberg nel 1889 (1), dice che, studiando quella teoria, si riconosceva aver le formule matematiche una vita propria, una ragione speciale, sembrar esse più intelligenti di noi, e talora anche di chi le stabiliva, dando di più di quanto cercava; ma che ciò non di meno la detta teoria si presentava come un arco gigantesco gettato su di un abisso di cose incognite. Le conferme sperimentali si limitavano alla verifica approssimata di alcune proposizioni, e, se rinforzavano le testate dell'arco, lasciavano la sua apertura ancora troppo grande per potervi fabbricar sopra, come su solida base, un monumento nuovo. Bisognava, prosegue, inalzare dal suolo due pilastri che sostenessero l'arco verso al suo mezzo; e l'uno di essi doveva essere la dimostrazione della possibilità di ottenere direttamente effetti elettrici o magnetici dalla luce; l'altro la dimostrazione della realtà di onde elettriche o magnetiche trasversali, propagantisi con la velocità stessa della luce. La costruzione del primo di questi pilastri, soggiunge, non è stata ancora intra-

(1) *Bull. de la Soc. intern. des Électriciens*; dicembre 1889.

Di queste comunicazioni è stato dato un largo sunto nella rivista *l'Elettricità di Milano*.

presa; ma quella del secondo (alla quale si dice fortunato di aver potuto lavorare, notando con molta modestia, che le sue esperienze erano state preparate da' suoi predecessori, di cui alcuni si erano avvicinati al risultato definitivo) è già molto innanzi: questo pilastro raggiungerà presto la sommità dell'arco, il quale potrà allora reggere il peso di tutto l'edilicio che deve innalzarsi su di esso.

Fa un poco maraviglia l'asserzione dell'Hertz che la costruzione del primo dei detti pilastri non sia per anco stata intrapresa, quando si osservi che l'Hertz stesso, sino dal 1887, inaugurava le ricerche sui fenomeni elettrici promossi dalle radiazioni, osservando l'influenza dei raggi ultravioletti sulla scarica elettrica; nelle quali ricerche l'Hallwachs e il Righi (1) scoprivano, l'anno appresso, quasi contemporaneamente, che i corpi si elettrizzano positivamente quando cadono su di essi le radiazioni ultraviolette; e il Righi trovava, come riconosce l'Hallwachs stesso, le leggi di questo fenomeno assai importante, che si può considerare come la prima pietra di quel pilastro.

Quanto poi ad effetti magnetici prodotti dalla luce, vi ha il fenomeno della magnetizzazione che assumono aghi d'acciaio esposti ai raggi solari violetti, osservato la prima volta dal Morichini nel 1813, verificato e studiato quindi da altri fisici, ma sul quale le sperienze del Moser e del Riess gettarono dubbi, onde fu quasi obliato. A torto però, perchè esso, massime dopo le recenti molteplici scoperte di elettro-ottica, non deve presentare, come dice egregiamente il prof. Fossati (2), dif-

(1) *Mem. R. Acc. Sc. di Bologna*, t. IX, 1888; e *N. Cimento*, t. XXV, marzo e aprile 1890. Sulla questione di priorità tra l'Hallwachs e il Righi, vedi *N. Cimento*, t. XXVIII, luglio e agosto 1890.

(2) Sulle recenti scoperte di Elettro-ottica. *Rivista Scientif. Indust. di Firenze*, 1888.

ficoltà ad essere ammesso, e merita di essere ripreso in esame.

Una corrente, che conserva il medesimo senso e la stessa intensità, percorre tutta la massa del conduttore; invece una corrente che varia periodicamente di senso, o anche solo di intensità, deve per l'auto-induzione, percorrere in maggior grado gli strati esterni del filo metallico, e lasciar libero l'interno di questo, tanto più quanto più breve è il periodo di variazione della medesima. Se vi ha inversione di senso parecchi milioni di volte al secondo, tutta la massa del conduttore deve essere affatto priva di corrente, cioè l'elettricità deve propagarsi soltanto all'esterno di esso. L'Hertz, con le sue vibrazioni elettriche rapidissime, ha potuto mettere alla prova dell'esperienza questa deduzione teorica (1). Egli, avendo disposto un lungo filo metallico perpendicolarmente al suo eccitatore e dinanzi ad una delle lamine del medesimo, ha trovato da prima che, coprendo un tratto del filo con lamine metalliche, o anche semplicemente con una serie di fili metallici tesi parallelamente ad esso, veniva difeso il tratto dalle variazioni elettriche prodotte dalle vibrazioni dell'eccitatore; imperocchè non scoccavano scintille in una interruzione per quanto breve del tratto, mentre se ne producevano in altre interruzioni situate da una parte o dall'altra di questo. E siccome ciò avveniva ugualmente tanto se largo o stretto era l'involucro, ed anche quando questo era sottilissimo (costituito da una foglia d'oro o da uno strato d'argento deposto su di un tubo di vetro), ha inferito che la superficie stessa del filo deve proteggere l'interno del medesimo dalle variazioni elettriche rapidissime, come un involuppo cattivo conduttore del calore difende i

(1) *Wied. Ann.* t. XXXVII, 1890; e *N. Cimento*, t. XXVI, settembre e ottobre 1890.

corpi interni da variazioni rapidissime di temperatura, e non da variazioni molto lente. Poscia, con altre esperienze ingegnosissime, ha dimostrato direttamente che la sede delle onde elettriche, prodotte nel filo dalle vibrazioni rapidissime del suo eccitatore, non è nel filo, ma nell'aria, o nell'altro dielettrico che lo circonda; per la qual cosa si dovrebbe dire che quelle onde non si propagano nel filo, ma strisciano sulla sua superficie.

La corrente elettrica si risguardava come qualche cosa che si propagasse unicamente nel conduttore, e l'energia che essa estrinseca in ogni punto di questo, come proveniente unicamente dagli altri punti del medesimo. Il Maxwell, partendo dalle idee del Faraday, considerò l'energia elettromagnetica nel mezzo dielettrico ambiente, e ammise che il moto ondulatorio elettromagnetico del medesimo, assorbito dai conduttori, desse luogo in questi ad uno *spostamento elettrico* continuo, cioè alla corrente; imperocchè, secondo lui, i conduttori cedono continuamente allo spostamento elettrico, vale a dire non sviluppassi in essi una resistenza al detto spostamento (l'*elasticità elettrica*, come egli la chiama), la quale si desta invece negli isolanti.

I buoni conduttori dell'elettricità dovevano quindi corrispondere ai corpi opachi, che assorbono le ondulazioni luminose dell'etere e si riscaldano; e i cattivi conduttori ai corpi trasparenti, i quali lasciano passare queste ondulazioni. A tale proposito il Maxwell dice che tutti i buoni conduttori dell'elettricità sono assai opachi, che i corpi solidi trasparenti sono cattivi conduttori; ma che vi ha un gran numero di eccezioni alla regola che, più i corpi sono opachi, più sono conduttori. Queste eccezioni però non infirmano per nulla, anzi starei quasi per dire convalidano, la sua teoria; chè l'assorbimento esercitato da un corpo sulle onde luminose e calorifiche dipende essenzialmente dalla lunghezza loro; per cui una stessa sostanza può, anzi direi quasi deve, compor-

tarsi riguardo alle onde elettriche, molto lunghe, diversamente che rispetto alle onde luminose, la cui lunghezza non sorpassa 7 centomillesimi di millimetro. La trasparenza e la diatermanità di una sostanza sono uguali solo per una stessa radiazione semplice qualunque: similmente l'opacità e la conduttività elettrica dovrebbero corrispondersi solo per una stessa ondulazione, che fosse ad un tempo luminosa ed elettrica.

Ma il Maxwell, se ha riconosciuto l'ufficio essenziale del dielettrico circostante, non è riuscito a liberarsi dal concetto comune che nella corrente vi abbia uno spostamento continuo, un flusso, secondo la lunghezza del filo conduttore. Primi ad allontanarsi da questo concetto, ancora incombenente, furono l'Heaviside (1) e il Poynting nel 1885. Quest'ultimo, in una Memoria sulla trasmissione dell'energia nel campo elettromagnetico (2), ha dimostrato, partendo dalle formule stesse del Maxwell, che l'energia si muove normalmente al piano determinato in ogni punto dalla forza elettrica e dalla forza magnetica, che la quantità di energia attraversante nell'unità di tempo l'unità di superficie è uguale al prodotto delle due forze, per il seno dell'angolo loro, diviso per 4π , e che la direzione del flusso è quella secondo cui si avanzerebbe una vite destrorsa, girante dalla direzione positiva della forza elettrica verso la direzione positiva della forza magnetica. E poichè in prossimità di un filo conduttore, percorso da corrente, e nell'interno di esso, le linee di forza elettrica sono parallele al filo e quelle di forza magnetica sono cerchi normali a questo e aventi il centro su di esso, ha concluso che l'energia, nelle vicinanze di un filo conduttore e nel suo interno, si muove normalmente al piano tangente al medesimo, cioè secondo il raggio di questo, e dalla su-

(1) *Electrician*, genn. 1885; *Phil Mag.* XXV, 1888.

(2) *Phil. Trans.*, 1884, vol. 175.

perficie verso l'asse. La corrente, invece che un flusso di energia secondo la lunghezza del conduttore, deve dunque essere riguardata come una convergenza di energia elettromagnetica dal mezzo dielettrico ambiente nel conduttore; e una sorgente di forza elettromotrice (la quale rappresenta un salto ascendente di potenziale nel senso in cui promuove la corrente) deve essere considerata al contrario come una diffusione di energia dal conduttore verso il mezzo circostante. L'energia elettromagnetica, che dal mezzo dielettrico ambiente entra nel conduttore, attraverso alla superficie esterna di questo, si trasforma integralmente in calore; per cui non deve esservi trasmissione alcuna di energia elettromagnetica nel conduttore secondo la sua lunghezza; e l'energia che la corrente estrinseca sotto forme diverse in un punto, non deve provenire dagli altri punti del conduttore, ma dal coibente circostante. Quando si lancia, dice il Poynting nella Memoria citata, una corrente elettrica in una gomina sottomarina, l'energia che mantiene la corrente e mette in moto l'ago (o il *Siphon recorder* del Thomson) all'altra estremità, procede nell'involucro isolante, e il conduttore interno di rame serve soltanto a mettere l'energia in moto.

Questi risultati teorici sono grandemente avvalorati dalle sperienze indicate, sulla trasmissione delle onde elettriche nei soli conduttori (anche qui dunque la teoria ha preceduto l'esperienza); e l'Hertz termina la nota in cui descrive quelle esperienze con le seguenti parole: Nel modo di considerare i fenomeni elettrici prevalso finora, i conduttori sono i corpi nei quali ha luogo facilmente la propagazione dell'elettricità, gli isolanti i corpi che si oppongono alla medesima: all'incontro, secondo gli ultimi risultati teorici e sperimentali, la trasmissione dell'eccitazione elettrica avverrebbe unicamente negli isolanti, e i conduttori opporrebbero a questa trasmissione una resistenza, nel caso di rapidissimi can-

glamenti di senso, insormontabile. Per ottemperare alle nuove vedute, sembra dunque che fosse d'uopo scambiare le denominazioni di conduttori e non conduttori. Non si arriva però a questo paradosso, quando si specifichi bene quale sia l'azione di cui si considera la trasmissione o la non trasmissione: i metalli sono senza dubbio non conduttori della forza elettrica, ma appunto per ciò, impedendo che dessa si disperda, sono conduttori della causa ipotetica di quella forza, cioè dell'elettricità, a cui si riferisce la terminologia consacrata dall'uso.

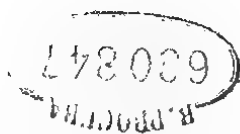
Concludo: se si può ora considerare dimostrato che l'azione elettrica non è altrimenti un'azione a distanza, ma un'azione della stessa natura della luce, cioè energia raggiante nell'etere, non si può ancora asseverare con sicurezza in che consista l'elettrizzazione e la corrente elettrica. Ci troviamo forse, riguardo a ciò, al punto in cui si era durante la prima metà del secolo presente rispetto al calore. L'identità del calore raggiante e della luce era messa fuori di dubbio dalle grandi scoperte del Melloni, la teoria ondulatoria della luce trionfava per opera del Fresnel, e ciò non di meno si considerava ancora dal più il calore come una sostanza. Nel 1828 Sadi Carnot enunciava la sua celeberrima proposizione, inaugurante la teoria delle macchine termiche e che condusse al 2° principio della termodinamica, nell'ipotesi che il calore fosse indistruttibile; e diceva: come l'acqua, abbassandosi di livello, somministra lavoro senza diminuire di quantità, così il calore, quando passa da un'alta ad una bassa temperatura, quando *cade* nella scala delle temperature, produce lavoro, restando inalterato nella sua quantità (1).

(1) In alcuni punti delle sue celebri *Réflexions*, manifestò però dubbi sulla conservazione o indistruttibilità del calore. Vedasi la Notizia su S. Carnot, pubblicata dal Saint-Robert negli *Atti dell'Accad. delle Sc. di Torino*, vol. IV, e ne' suoi *Principes de Thermodynamique*.

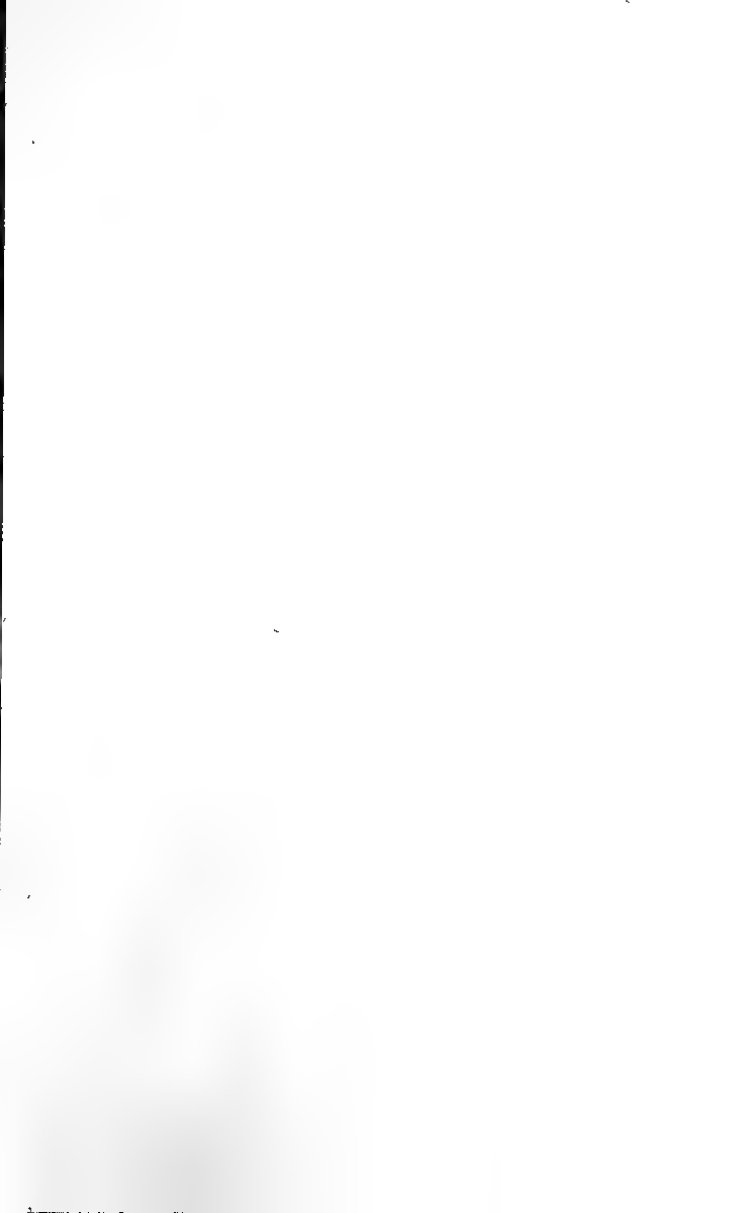
Ciò che il Carnot diceva del calore, diciamo dell'elettricità, quando ne ammettiamo la conservazione, quando la paragoniamo all'acqua. Vedendo che ad un elettrizzamento positivo di un corpo corrisponde un elettrizzamento negativo uguale di un altro o di altra parte dello stesso corpo, si è riferito l'elettrizzamento ad un *quid*, l'elettricità, che si conserva e non si trasforma, come si conserva e non si trasforma la materia. Ma si può osservare che spesso ad un riscaldamento di un corpo corrisponde un raffreddamento di un altro o di altra parte dello stesso corpo, e che ciò non di meno non si attribuisce la temperatura, la quale corrisponde perfettamente al potenziale elettrico, ad un *quid* speciale, temperatura, che si conservi e non si trasformi, ma la si risguarda come una condizione, ancora non nota in generale nella sua modalità, dell'energia cinetica calore. È ben vero che per le azioni meccaniche o chimiche si produce calore, cioè si ha innalzamento di temperatura in un corpo, senza che vi abbia raffreddamento di un altro o di altra parte del corpo stesso; mentre per le azioni meccaniche strofinio, induzione ecc., si destano entrambi i due stati elettrici in quantità uguali; ma si deve ammettere impossibile che, per altre azioni, si sviluppino uno solo dei due stati elettrici o, ciò che è lo stesso, si destino due quantità non eguali di questi due stati? Nell'importantissimo fenomeno, testè scoperto, dell'elettrizzamento di un corpo per le radiazioni ultraviolette che cadono su di esso, deve ammettersi che si desti in un altro corpo, per es. nella sorgente delle radiazioni, lo stato elettrico opposto, in quantità eguale, anche se non si riuscisse a dimostrar ciò con l'esperienza? Il destarsi sempre lo stato elettrico positivo nel corpo su cui cadono le radiazioni, sia esso conduttore, semiconduttore o isolante, non potrebbe essere un indizio che in questo fenomeno si sviluppasse uno degli stati elettrici indipendentemente dall'altro? Non potrebbe qui

trattarsi di un fenomeno simile a quelli della trasformazione dell'energia meccanica in calore, che hanno condotto ad abbandonare l'ipotesi materiale del calore? Queste interrogazioni, non senza grandissima esitazione, oso rivolgere agli eminenti cultori della scienza elettrica fra noi. Quel *quid* che chiamiamo elettricità, che misuriamo, che siamo tanto abituati ad ammettere stagnante o fluente nei corpi, senza averlo mai veduto, toccato o altrimenti sentito, che non si può dire trasformarsi in energia o essere una trasformazione dell'energia, potrebbe essere destinato a scomparire dalla scienza, e il potenziale elettrico o elettromagnetico, ciò che realmente solo si manifesta, potrebbe essere una condizione o una manifestazione dell'energia dei corpi o dell'etere, diversa dalla temperatura.





4006.4



400.6.4



D. Tedeschi e Figlio, Editori
VERONA

LA BIBLIOTECA
DELLE
SCUOLE ITALIANE

PROF. GIUSEPPE FINZI, DIRETTORE

Esce due volte al mese, al 1.º ed al 16 d'ogni mese

Abbonamento dal 1.º ott. 1890 al 30 sett. 1891
L. 8.50

Gli abbonamenti si ricevono presso l'AMMINISTRAZIONE IN VERONA, Donato Tedeschi e Figlio, Editori.

